

Bericht - Kostenvergleich zwischen WP-PV- Systemen und herkömmlicher thermischer Sanierung

11.12.2014

Auftraggeber

Förderverein des Institutes für
Energiesysteme (FV-IES)

Autor

Matthias Berthold

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB
Werdenbergstrasse 4
CH-9471 Buchs / SG

Tel.nr +41 (81) 755 31 51

E-Mail: matthias.berthold@ntb.ch

Web: <http://www.ntb.ch/ies>

Inhalt

1	Abstract	3
2	Allgemeines	4
3	Thermische Sanierung.....	6
3.1	Abschätzung der thermischen Sanierungskosten	6
4	Wärmepumpe-Photovoltaik System (WP-PV).....	11
4.1	Systemkosten einer WP-PV-Kombination (Wärmepumpe + PV-Anlage).....	11
4.1.1	Stromgestehungskosten der PV-Anlage (Rp./kWh)	11
4.1.2	Gestehungskosten des Wärmepumpensystems (ohne Primärenergiekosten).....	17
4.2	Kosten für die benötigte Heizwärme	18
4.2.1	Kosten für die Heizwärme bei 100% Deckung durch PV-Anlage.....	20
4.2.2	Kosten für die Heizwärme in Abhängigkeit des Eigenverbrauchanteiles.....	21
4.2.3	Kosten für die Heizwärme ohne PV-System.....	22
5	Dämmkosten im Vergleich zu den WP-PV-Kosten	23
6	Zusammenfassung und Ausblick	25
7	Literaturverzeichnis.....	26
8	Anhang - Verwendete Kurzzeichen	27
8.1	Tabelle - Sensitivitätsanalyse der PV-Gestehungskosten (Rp./kWh_el)	28
8.2	Tabelle - Sensitivitätsanalyse der Wärme-Gestehungskosten (Rp./kWh_th bei WP-PV-System).....	29

1 Abstract

In den letzten Jahren konnte der Heizwärmebedarf von Gebäuden stetig gesenkt werden, was vor allem mithilfe eines erhöhten Dämmaufwandes realisiert wurde. Bei den in dieser Arbeit betrachteten 9 Sanierungsprojekten lagen die relativen **Dämmkosten** im Bereich von **8....28 Rappen pro eingesparter thermischer Kilowattstunde und Jahr**.

Ein anderer Ansatz als Energie durch konventionelle Dämmmaßnahmen einzusparen besteht darin, diese sonst „reduzierte“ Heizenergiemenge zusätzlich ökologisch mithilfe einer Photovoltaik-Anlage und einem Wärmepumpensystem zu erzeugen. Aktuell liegen die Gestehungskosten für thermische Energie aus einem **WP-PV-System** im Bereich von **13....20 Rappen pro erzeugter thermischer Kilowattstunde und Jahr**. Hierbei wird die PV-Anlage so dimensioniert, dass Sie den gesamten zusätzlichen Wärmebedarf über das Jahr gesehen abdeckt und somit keine zusätzliche Primärenergie benötigt wird. Dabei ist zu beachten, dass die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einem **förderfreien PV-Einspeisetarif von 7¹ Rp./kWh** und einem **Netzbezugstarif von 20 Rp./kWh** durchgeführt wurde. Darüber hinaus wurden die gesamten Systemkosten nur auf den durch eine sonstige Dämmmaßnahme eingesparten Heizwärmebedarf umgelegt, eventuell mögliche Synergien mit einer Brauchwarmwassererzeugung bzw. allenfalls benötigten Heizsystemen wurden nicht berücksichtigt. Die **Nutzungsdauer** der thermischen **Sanierungsmaßnahmen** wurde hier mit **30 Jahre**, die Nutzungsdauer des **WP-PV Systems** mit **20 Jahre** angesetzt.

Beachtlich dabei ist, dass trotz dieser ökonomisch ungünstigen Annahmen für das WP-PV System die Wärme gestehungskosten aktuell bereits teilweise unter den thermischen Sanierungskosten liegen!

Zukünftig ist davon auszugehen, dass die **Dämmkosten weiter steigen** und die **WP-PV Systemkosten weiter sinken** werden, wodurch die Attraktivität von Wärmepumpen-Photovoltaik Systemen noch zunehmen wird.

Auch eine **Kombination** beider Ansätze könnte zukünftig immer häufiger zu einem Optimum führen:

- **Dämmen** soweit es ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist
- **WP-PV Systems** zur Abdeckung des Restwärmebedarfs

¹ Hier wird mit 7 Rp./kWh eine Vergütung ohne Förderungen angenommen. Aktuell liegt der Marktpreis im Bereich von 6 - 8 Rp/kWh.

2 Allgemeines

In den letzten Jahrzehnten reduzierte sich der End- und Primärenergiebedarf von Gebäuden stetig. Dies ist vor allem auf Energieeffizienzsteigerungen in der gesamten Gebäudetechnik und die vermehrte Dämmung zurückzuführen. Der durchschnittliche End- und Primärenergiebedarf liegt mittlerweile um den Faktor 4.5 niedriger als bei Vorkriegsgebäuden [1, S. 39].

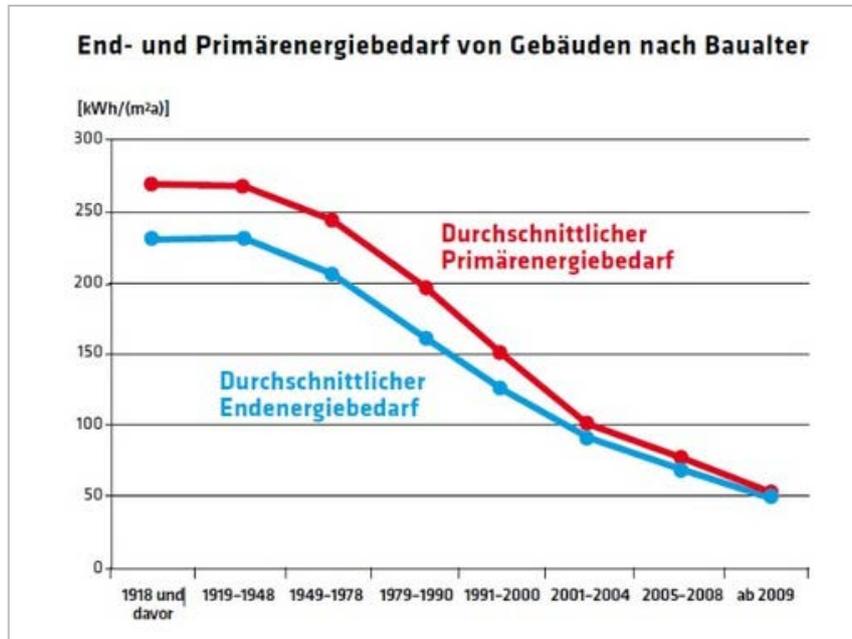
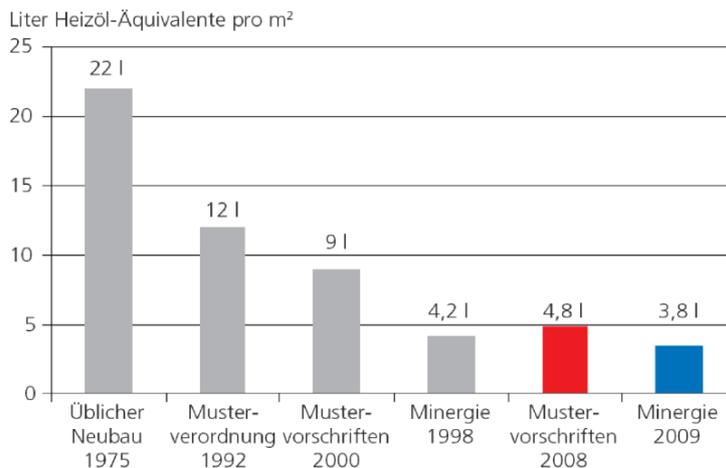


Abbildung 1: Durchschnitt des End- und Primärenergiebedarfs nach Baualter (dena Gebäudereport 2012)

Bund und Kantone wollen mit dem Gebäudeprogramm den Energieverbrauch im Schweizer Gebäudepark erheblich reduzieren und den CO₂-Ausstoss senken, was entsprechend in der Entwicklung des Wärmebedarfs zu erkennen ist [2, S. 5].

Entwicklung Wärmebedarf von Neubauten



Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

Neue MuKEn
23 April 2009, Seite 5

Abbildung 2: Entwicklung des Wärmebedarfs in der Schweiz entsprechend der neuen „Mustervorschrift der Kantone im Energiebereich“, Stadt Zürich, April 2009 (1 Heizöl EL = 10 kWh/l)

In der Schweiz fallen über 40% des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen im Gebäudebereich an. Aktuell geht man davon aus, dass rund 1,5 Mio. Häuser energetisch dringend sanierungsbedürftig sind. Pro Jahr wird ca. 1% der bestehenden Liegenschaften thermisch saniert bzw. erneuert [3].

Bislang wird häufig davon ausgegangen, dass diese klassische thermische Sanierung oder aber ein Ersatz-Neubau die beste Möglichkeit für die gewünschte Reduktion des Energiebedarfes darstellt, wobei die Umweltverträglichkeit² der eingesetzten Dämmstoffe nicht immer berücksichtigt wird.

Ein anderer Ansatz ist die benötigte Heizenergie zusätzlich umweltfreundlich Vorort zu erzeugen und für den thermischen Bedarf zu verwenden, anstatt Heizenergie durch eine thermische Sanierung einzusparen. Hierfür bietet sich die Kombination einer Wärmepumpen mit einer Photovoltaik-Anlage besonders an, da aus der erzeugten elektrische Energie mithilfe der Umweltwärme ein Mehrfaches an thermischer Energie zur Verfügung gestellt werden kann.

Zudem sind in den letzten Jahren die PV-Systemkosten so stark gesunken, dass eine PV-Wärmepumpenkombination nicht nur eine ökologische, sondern auch eine ökonomische Alternative zur Wärmedämmung darstellen kann. Ein weiterer Vorteil dieser Kombination besteht darin, dass die im Sommer häufig erzeugte „elektrische Überschussenergie“ direkt genutzt (Eigenverbrauch) oder in das elektrische Netz eingespeist werden kann.

Solarthermie-Anlagen werden hier nicht betrachtet, da einerseits die Anzahl der Neuinstallationen seit einigen Jahren stark abnimmt [4, S. 14] (auch aufgrund der Konkurrenzsituation mit PV-Anlagen) und andererseits der vor allem im Sommer hohe Wärmeertrag nur wenig genutzt (keine Heizenergie nötig) und typischerweise kaum gespeichert werden kann [5].

In diesem Bericht sollen nun speziell die ökonomischen Aspekte herkömmlicher Wärmedämmung im Vergleich zu einer WP-PV-Kombination betrachtet werden.

² Unter Umweltverträglichkeit versteht man hier vor Allem den Energieaufwand bzw. die CO₂-Emissionen bei der Herstellung und dem Transport, die Abgabe von Schadstoffen sowie die Aufwendungen bei der Entsorgung.

3 Thermische Sanierung

In Abbildung 3: Typische Wärmeverluste eines Hauses dargestellt, wonach eine erste Einschätzung in Bezug auf möglichst effiziente Sanierungsmassnahmen getroffen werden kann³:



Abbildung 3: Typische Wärmeverluste eines Hauses

Die tatsächlich auftretenden Wärmeverluste sind vom aktuellen Gebäudezustand abhängig und können von den typischen Werten erheblich abweichen.

3.1 Abschätzung der thermischen Sanierungskosten

Für eine erste Abschätzung der Sanierungskosten wurden die erhaltenen Daten von 6 Projekten [6], zwei Modellrechnungen mit einem Sanierungskonfigurator des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie [7] sowie publizierte Daten [8], [9] verwendet.

Projekt	Objekt	EBF	Qh vor Sanierung	Qh nach Sanierung	Sanierungskosten
		[m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[CHF]
GS098	REFH Eckhaus	155	104.2	45.8	114'300
GS113	EFH freistehend	512	66.6	21.1	260'600
GS114	EFH freistehend	197	180.6	49.0	202'900
GS133	EFH freistehend	121	182.0	59.0	176'400
GS139	EFH freistehend	420	217.0	52.0	507'800
GS145	EFH freistehend	386	105.0	32.0	259'400
-	Artikel 1 für EFH	-	70.0	31.5	- ⁴
-	Sanierungskonfiguration (BJ 84 bis 94)	150	201.0	139.0	49'063
-	Sanierungskonfiguration (BJ 95 bis 04)	150	174.0	130.0	49'063

Tabelle 1: Rohdaten der Sanierungsprojekte

³ Quelle: <http://www.energiesparen-im-haushalt.de/waermeverlust-haus.jpg>

⁴ Im Artikel wurden die thermischen Gestehungskosten (Rp./kWh) angegeben, welche in Tabelle 2 angeführt sind.

Die jährliche Energieeinsparung ergibt sich aus der Differenz des Heizwärmebedarfes Q_h vor und nach der Sanierung multipliziert mit der Energiebezugsfläche (EBF):

$$E_H\text{-Einsparung} = (Q_{H\text{-vor Sanierung}} - Q_{H\text{-nach Sanierung}}) * EBF \quad \dots \text{ in [kWh / Jahr]}$$

Um die Wirtschaftlichkeit einer Sanierung bewerten zu können, werden zunächst die gesamten Sanierungskosten entsprechend der Nutzungsdauer und des gewünschten Kapitalzinses auf eine konstante jährliche Annuität umgerechnet. Allgemein berechnet sich die Annuität zu:

$$\text{Annuität} = \text{"RMZ"} = \text{Investitionskosten} \cdot \frac{\text{Kapitalzins} \cdot (1 + \text{Kapitalzins})^{\text{Nutzungsdauer}}}{(1 + \text{Kapitalzins})^{\text{Nutzungsdauer}} - 1}$$

Excel stellt für die Berechnung der Annuität die Funktion „RMZ“ (Regelmäßige Zahlung) zur Verfügung, welche nach obiger Formel berechnet und hier aus Gründen der Übersichtlichkeit weiter im Text verwendet wird.

Somit erhält man den Jahreskostenanteil (JKA) für den Sanierungsaufwand zu:

$$JKA_Sanierung = \text{RMZ}(\text{Kapitalzins}, \text{Nutzungsdauer}, \text{Sanierungskosten}) \quad \dots \text{ in [CHF / Jahr]}$$

Geht man davon aus, dass der Kostenanteil für die zusätzliche Wärmedämmung ca. 30% der Sanierungskosten beträgt, ergibt sich der Jahreskostenanteil für diese Wärmedämmung zu:

$$JKA_Wärmedämmung = JKA_Sanierung * 0,3 \quad \dots \text{ in [CHF / Jahr]}$$

Bezieht man diesen Jahreskostenanteil auf die jährlich eingesparte Energiemenge, erhält man die thermischen Gestehungskosten⁵:

$$GK_thermisch = JKA_Wärmedämmung / E_H\text{-Einsparung} \quad \dots \text{ in [CHF / kWh]}$$

Für die Datenauswertung wurden im Wesentlichen folgende Annahmen getroffen:

- o) erwartete Nutzungsdauer der Dämmung: 30 Jahre⁶
- o) Kostenanteil für Dämmung: 30% der Sanierungskosten
- o) Jährliche Kapitalverzinsung: 3%

⁵ Gestehungskosten enthalten alle Kosten, welche bei einer gewünschten Energieumwandlung anfallen. Sie beinhalten Kapitalkosten, fixe und variable Betriebskosten, Brennstoffkosten sowie die angestrebte Kapitalverzinsung über den Betriebszeitraum.

⁶ Zum Vergleich: Für die Nutzungsdauer des WPPV-Systems wurden 20 Jahre angenommen

Somit konnte für jedes Objekt die jährlich thermisch eingesparte Energie (Delta Qh), der Jahreskostenanteil für die gesamte Sanierung (JKA-Sanierung) sowie die Gestehungskosten für die eingesparte Energie ermittelt werden:

Projekt	Objekt	Delta Qh	Nutzungs-	JKA-	GK-
		[kWh/m ²]	dauer [Jahre]	Sanierung [CHF/ Jahr]	Thermisch [Rp. / kWh]
GS098	REFH Eckhaus	58.3	30	5'832	19.3
GS113	EFH freistehend	45.5	30	13'296	17.1
GS114	EFH freistehend	131.6	30	10'352	12.0
GS133	EFH freistehend	123.0	30	9'000	18.1
GS139	EFH freistehend	165.0	30	25'908	11.2
GS145	EFH freistehend	73.0	30	13'234	14.1
-	Artikel 1 für EFH	38.5	30		28.3
-	Sanierungskonfiguration (BJ 84 bis 94)	62.0	30	2'503	8.1
-	Sanierungskonfiguration (BJ 95 bis 04)	44.0	30	2'503	11.4
-	Mittelwert	82.3	30	10'328	15.5

Tabelle 2: Thermische Energie-Gestehungskosten, Jahreskostenanteil und die jährlich eingesparte therm. Energie der Sanierungsprojekte

Erläuterung zu Tabelle 2 am Beispiel der Gebäudesanierung GS098:

Der jährliche Heizwärmebedarf reduzierte sich von 104,2 kWh pro Quadratmeter und Jahr vor der Sanierung auf 45.8 kWh/m² und Jahr danach. Der jährliche Kostenanteil für die Dämmung (= 5'832 CHF/Jahr * 0.3) wurde nun auf die eingesparte Energiemenge pro Jahr (= 58.3 kWh/m² * 155 m²) bezogen. So erhält man die Gestehungskosten von 19.3 Rappen pro eingespartem kWh thermisch.

In Abbildung 4 sind die Gestehungskosten sowie der dazugehörige Heizwärmebedarf vor und nach der Sanierung dargestellt. Dies bedeutet am Beispiel von GL098, dass die Senkung des HWB von 104,2 kWh/m² auf 45.8 kWh/m² Kosten von 19.3 Rp./kWh eingesparter Energie verursacht.

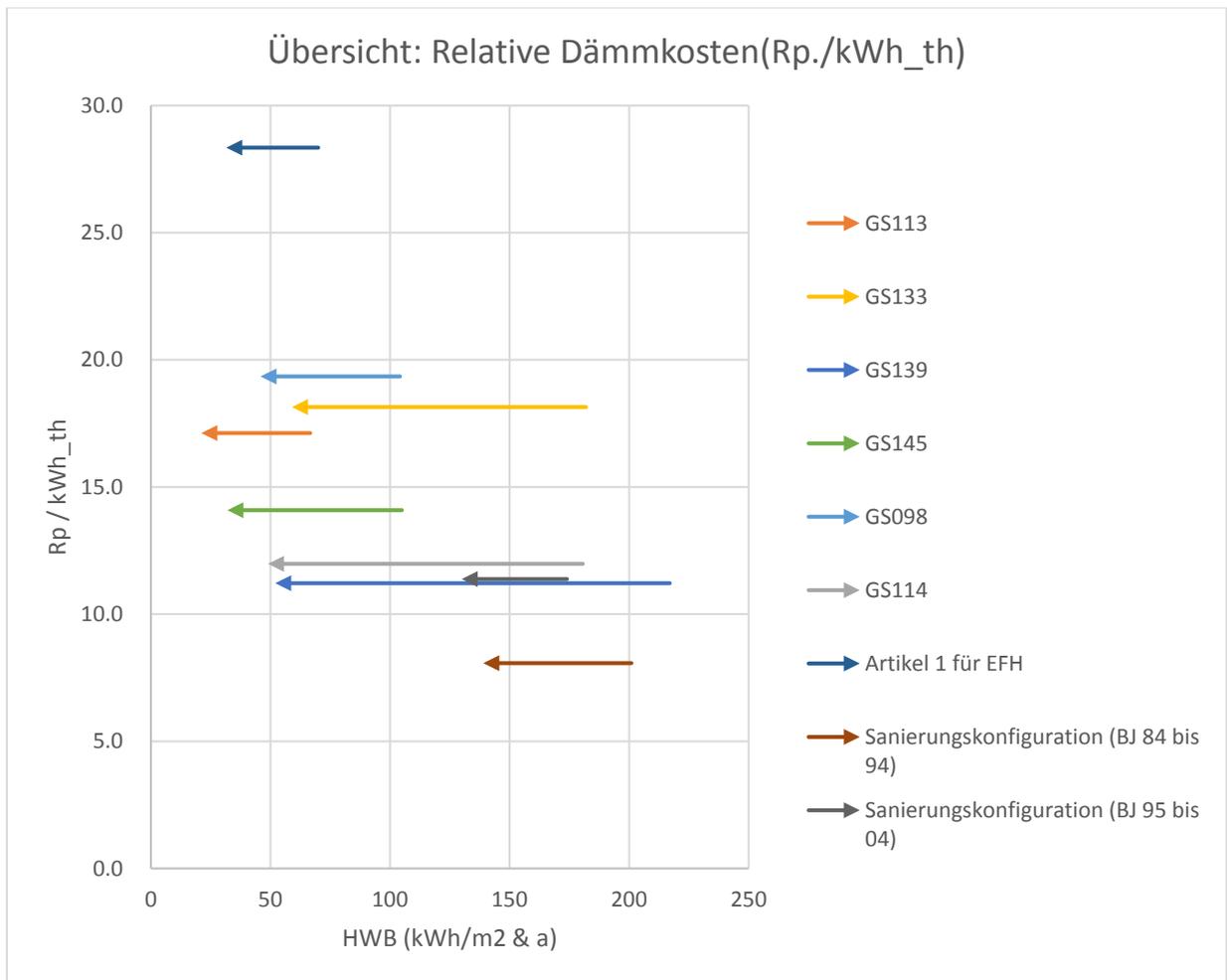


Abbildung 4: Darstellung der ermittelten Dämmkosten in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfes vor und nach der Sanierung

Generell hat der energetische Startpunkt vor der thermischen Sanierung sowie der gewünschte Wärmebedarf nach der Sanierung einen wesentlichen Einfluss auf die anfallenden Sanierungs- und Dämmkosten.

Darstellungsmöglichkeit einer Dämmkostentendenz:

Allgemein kann man davon ausgehen, dass der Aufwand für Dämmmaßnahmen steigt, je besser der aktuelle Dämmzustand und dementsprechend je geringer der aktuelle Heizwärmebedarf ist. Die relativen Dämmkosten (= absolute Dämmkosten / (HWB_{vorSanierung} - HWB_{nachSanierung})) berücksichtigen dabei die Sanierungsintensität, nicht aber den Start- und Endpunkt der Sanierung. Nun wird eine Möglichkeit gesucht, wie eine konkrete Dämmmaßnahme einem charakteristischen Heizwärmebedarf zugeordnet werden kann.

Geht man davon aus, dass die Dämmkosten etwa umgekehrt proportional mit dem sinkendem Heizwärmebedarf steigen (Dämmkosten $\approx 1/\text{Heizwärmebedarf}$), so erhält man eine gute Vergleichbarkeit, wenn die relativen Dämmkosten am harmonischen Mittelwert⁷ des Heizwärmebedarfs vor und nach der thermischen Sanierung dargestellt werden:

$$HWB_{\text{Position_Neu}} = \frac{2}{\frac{1}{HWB_{\text{vorSanierung}}} + \frac{1}{HWB_{\text{nachSanierung}}}}$$

Mit dieser Annahme trägt man dem Umstand Rechnung, dass sowohl der Gebäudeszustand als auch die Sanierungsintensität berücksichtigt werden, wobei günstigere Sanierungsanteile weniger stark gewichtet werden.

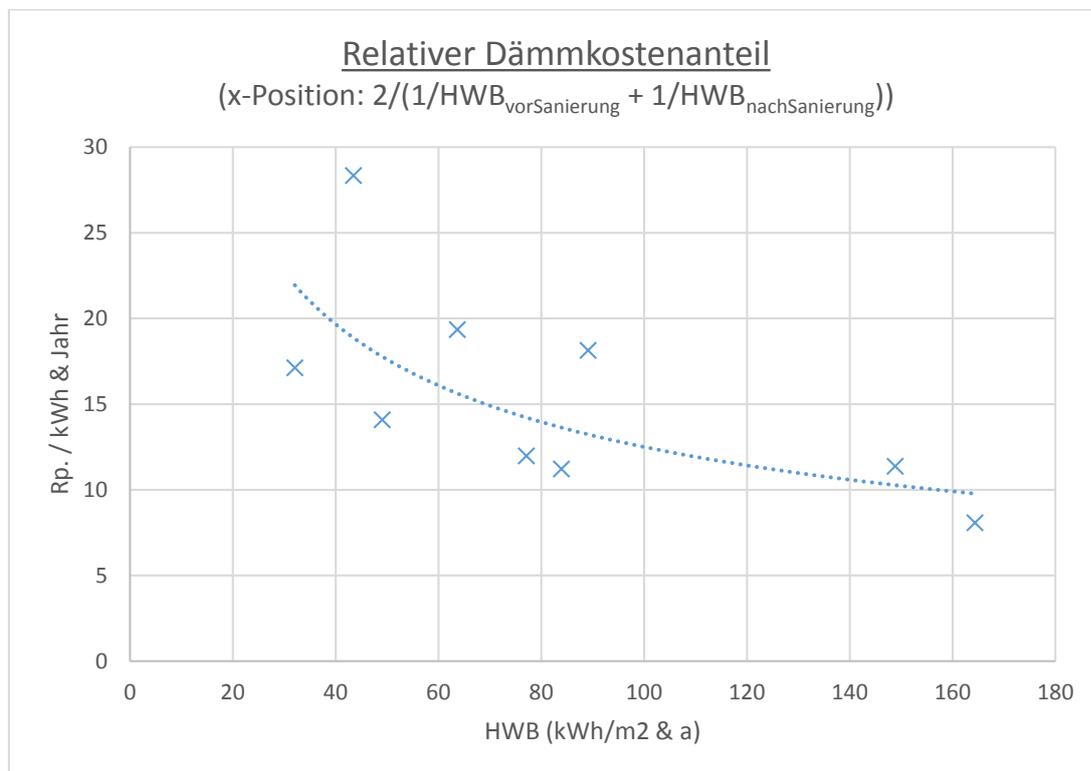


Abbildung 5: Relative Dämmkostenanteil in Rp./ kWh, dargestellt am harmonischen Mittelwert des HWB $[=(2 / (1/HWB_{\text{vorSanierung}} + 1/HWB_{\text{nachSanierung}}))]$

Anmerkung: Die hier angeführten Abschätzungen liefern grobe Anhaltswerte für Dämmkosten. Aufgrund des unterschiedlichen Hausbestandes und der unterschiedlichen Wünsche der Hausbesitzer ist eine generelle Abschätzung, welche Maßnahmen welche Kosten bei einer Wärmedämmung nach sich ziehen, nur schwer möglich. Entscheidend ist aber sowohl der Startpunkt sowie der gewünschte Endpunkt: Ob man aus einem Altbau ein Passivhaus machen möchte, oder ob die Sanierung nach dem „Gut und günstig“-Prinzip erfolgt, spielt dabei eine wesentliche Rolle. Dies soll mithilfe des harmonischen Mittelwertes berücksichtigt werden.

⁷ Für den harmonischen Mittelwert zweier Zahlen gilt: $1/m + 1/n = 2/m = 1/x_1 + 1/x_2$

4 Wärmepumpe-Photovoltaik System (WP-PV)

Anstatt die gewünschte Energie mithilfe von Isoliermassnahmen einzusparen, könnte es ökologisch wie ökonomisch sinnvoll sein, diese Heizenergie mithilfe einer Wärmepumpe sowie einer PV-Anlage (zusätzlich) zu erzeugen. Im Folgenden werden nun die Gestehungskosten für thermische Energie, welche mithilfe einer WP-PV-Kombination erzeugt werden, abgeschätzt.

Energetisch wird das WP-PV-System so ausgelegt, dass die für den Wärmepumpenbetrieb benötigte Energie von der PV-Anlage über das Jahr gesehen selbst erzeugt wird. In diesem Fall spricht man von energetischer Autonomie oder Jahresnullbilanz, welche relativ leicht erreichbar ist.

Die zeitliche Korrelation zwischen der Erzeugung und dem Verbrauch wird mithilfe des sogenannten Eigenverbrauchsanteils berücksichtigt. Das elektrische Netz dient dabei als saisonaler Speicher, welches die Differenz zwischen aktuellem Verbrauch und aktuellem Bedarf ausgleicht. Für die zwischengespeicherte Energie wird eine Speichergebühr von ca. 13 Rp./kWh berücksichtigt (Differenz aus PV-Netzeinspeisetarif (7 Rp./kWh) und Netz-Bezugspreis (20 Rp./kWh)⁸), weshalb die Wirtschaftlichkeit des WP-PV-Systems mit steigendem Eigenverbrauchsanteil zunimmt.

4.1 Systemkosten einer WP-PV-Kombination (Wärmepumpe + PV-Anlage)

Die Systemkosten der WP-PV-Kombination setzen sich aus den Systemkosten der Wärmepumpe und der PV-Anlage zusammen, welche nun näher betrachtet werden.

4.1.1 Stromgestehungskosten der PV-Anlage (Rp./kWh)

Die PV-Systempreise für komplett installierte PV-Anlagen sind seit 2006 um mehr als 60% auf mittlerweile unter 2'100 CHF / kWp gesunken [10].

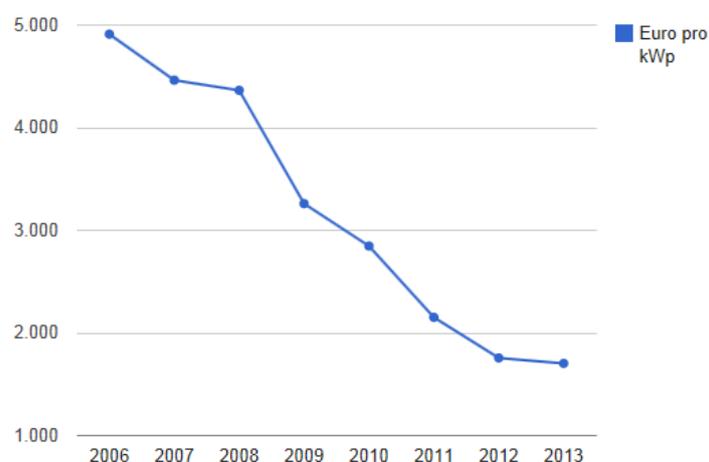


Abbildung 6: Aktuelle PV-Preise pro kWp für Aufdachanlagen (Quelle: BSW-Solar/EuPD Research)

⁸ Da bei der Nettomessung für die selbstverbrauchte Energie einer PV-Anlage keine Netznutzungsgebühren und Abgaben anfallen, entspricht der Wert dieser Energie dem Netz-Bezugspreis.

Unter der Annahme einer Systemnutzungsdauer von 20 Jahren und einer gewünschten Kapitalverzinsung von 3% erhält man einen Jahreskostenanteil (Annuität) für die Investition in eine PV-Anlage von ca. 140 CHF / kWp und Jahr:

$$\begin{aligned} JKA_{PV_Anlage} &= \text{RMZ (Kapitalzins, Nutzungsdauer, - Investitionskosten)} = \\ &= \text{RMZ (3\%, 20 Jahre, - 2'100 CHF/kWp)} = \\ &= 141 \text{ CHF / kWp und Jahr} \end{aligned}$$

Bei einem Jahresenergieertrag (Yield) von 1'000 kWh pro kWp installierter Leistung kommt man damit auf Strom-Gestehungskosten (GK) bei einer PV-Anlage von

$$\begin{aligned} GK_{PV_Anlage} &= JKA_{PV_Anlage} / \text{Yield} = \\ &= 141 \text{ CHF/kWp} / 1'000 \text{ kWh/kWp} = \\ &= 14.1 \text{ Rp./kWh}_{EI} \end{aligned}$$

Zu den reinen Investitionskosten kommen noch die Kosten für die Wartung, Instandhaltung, Versicherung und den Betrieb dazu. Diese betragen typischerweise 1 bis 2 % der Investitionskosten pro Jahr. Hier wird mit einem Betriebskostenanteil (BK_{Anteil}) von 1.5% pro Jahr gerechnet:

$$\begin{aligned} GK_{PV_Wartung} &= \text{Investitionskosten} * 1.5 \% / \text{Yield} = \\ &= 2'100 \text{ CHF/kWp} * 1.5\% / 1'000 \text{ kWh/kWp} = \\ &= 3.2 \text{ Rp./kWh}_{EI} \end{aligned}$$

Damit ergeben sich die gesamten Gestehungskosten zu

$$\begin{aligned} GK_{PV_Gesamt} &= GK_{PV_Anlage} + GK_{PV_Wartung} = \\ &= 14.1 \text{ Rp./kWh} + 3.2 \text{ Rp./kWh} = \\ &= 17.3 \text{ Rp./kWh}_{EI} \end{aligned}$$

Allgemein werden die Stromgestehungskosten einer PV-Anlage (GK_{PV_Gesamt}) ermittelt:

$$GK_{PV_Gesamt} = \frac{\text{RMZ(Kapitalzins, Nutzungsdauer, -Investkosten)} + \text{Investkosten} * BK_{\text{Anteil}}}{\text{Yield}}$$

Um den Einfluss der einzelnen Parameter besser abschätzen zu können, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit einer Parametervariation von 50% bis 150% durchgeführt (Wertetabelle ist im Anhang ersichtlich):

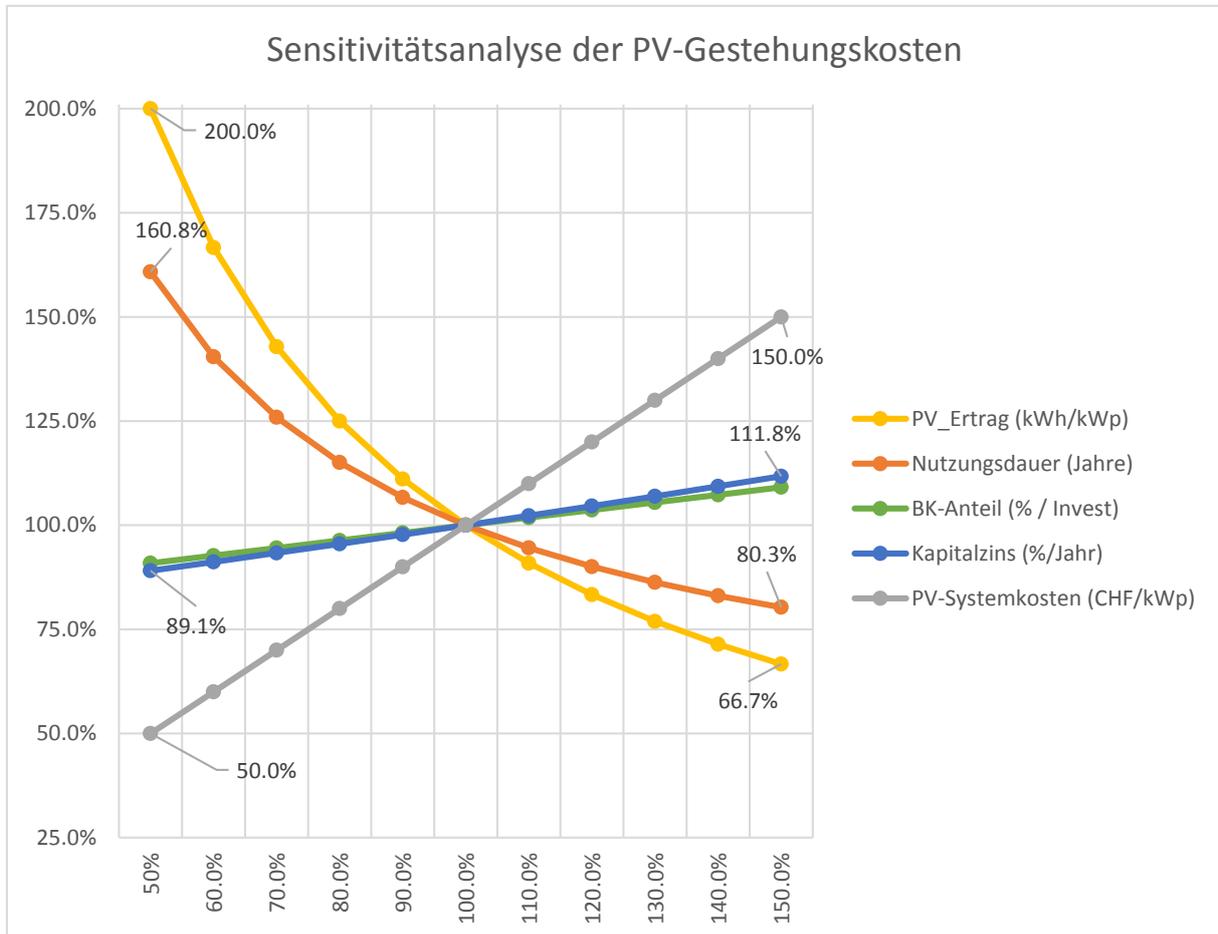


Abbildung 7: Sensitivitätsanalyse der Stromgestehungskosten einer PV-Anlage mit folgenden 100% Annahmen: PV_Ertrag = 1'000 kWh/kWp, Nutzungsdauer = 20 Jahre, BK-Anteil = 1.5 %, Kapitalzins = 3%/Jahr, PV-Systemkosten = 2.1 kCHF/kWp

Den grössten Einfluss auf die Stromgestehungskosten hat der Jahresenergieertrag (PV_Ertrag). Erhält man nur 50% des Energiebetrages, verdoppeln sich die Gestehungskosten. Erhält man 50% Mehrertrag, reduzieren sich die Stromgestehungskosten um 1/3. Steigert man die Nutzungsdauer von 20 auf 30 Jahre, so reduzieren sich die Gestehungskosten um knapp 20 %. Die PV-Systemkosten wirken direkt 1:1 auf die Gestehungskosten durch. Der Kapitalzins und die Betriebskosten verändern das Ergebnis ebenfalls linear, bei der Variation 50% bis 150% um max. +/- 10%.

Zukünftig ist mit einer weiteren Reduktion der PV-Systemkosten und dementsprechend mit den PV-Gestehungskosten zu rechnen. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) geht davon aus, dass die Stromgestehungskosten bis 2030 unter 12 Rp./kWh (unter 10 Cent/kWh) fallen [11, S. 3].

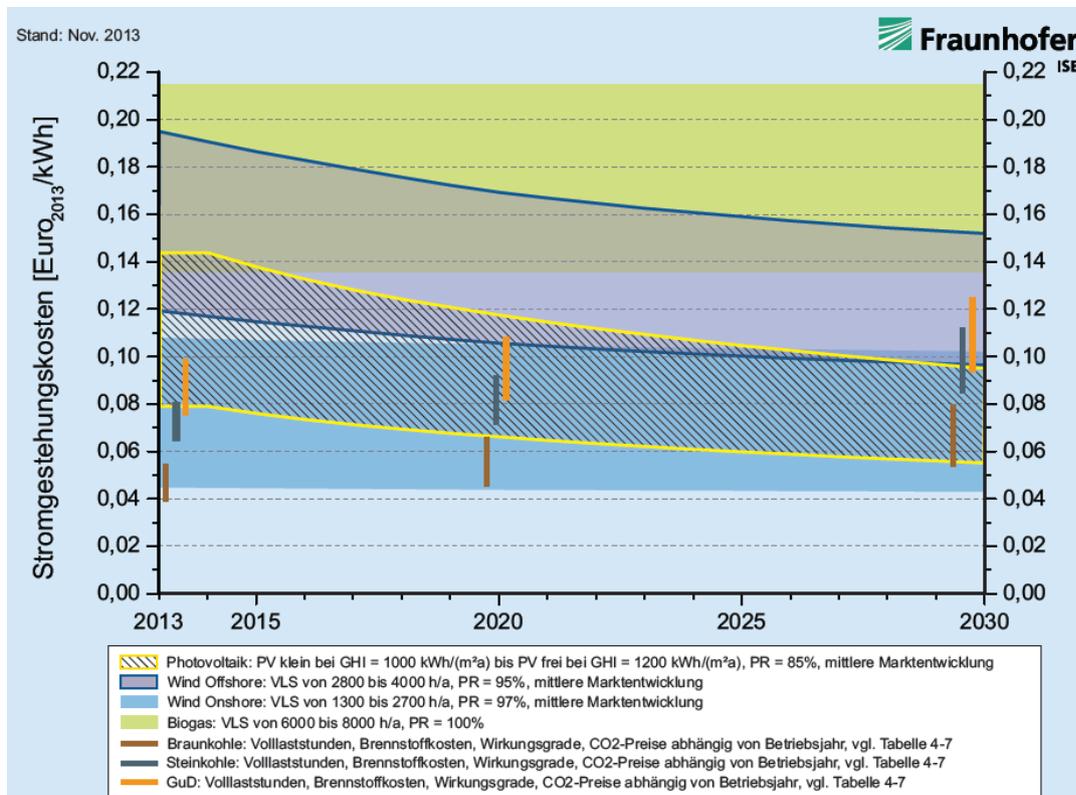


Abbildung 8: Lernkurvenbasierte Prognose der Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien und konventioneller Kraftwerke (Deutschland bis 2030)

4.1.1.1 Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage

Die Wirtschaftlichkeit eines PV-Systems hängt im Wesentlichen von

- den Stromgestehungskosten der PV-Anlage,
- dem Netz-Bezugstarif (BT),
- dem Netz-Einspeisetarif (ET),
- sowie dem Eigenverbrauchsanteil (EVA) ab.

Der Eigenverbrauchsanteil (EVA) gibt an, wieviel Prozent des erzeugten Solarstroms direkt vor Ort selbst verbraucht wird:

$$\text{EVA} = \frac{\text{Direkt selbstverbraucher Strom}}{\text{Jahreserzeugung der PV-Anlage}}$$

Hierbei macht es aus Sicht der PV-Anlage keinen Unterschied, ob die erzeugte Energie aktuell für die Wärmepumpe oder sonst im Haushalt verwendet wird. Deshalb soll hier in weiterer Folge der Verbrauch des Haushaltes mit berücksichtigt werden, welcher zu einer Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils (EVA) führt.

Ohne PV-Anlage ergeben sich die elektrischen Energiekosten (EK) für die Wärmepumpe und den Haushaltsbedarf⁹ entsprechend dem Bezugstarif (BT) zu:

$$EK_{\text{ohne PV}} = BT * (WP_{\text{Energie}} + HB_{\text{Energie}}) \dots \text{Energie-Kosten}$$

Mit PV-Anlage setzen sich die Kosten für die elektrische Energie entsprechend dem Eigenverbrauchsanteil (EVA), aus den Kosten der PV-Anlage, den Netzbezugskosten sowie dem Einspeisetarif der elektrischen Energie zusammen.

$$EK_{\text{mit PV}} = \begin{array}{ll} BT * (WP_{\text{Energie}} + HB_{\text{Energie}} - EVA * PV_{\text{Erz}}) & \dots \text{Kosten für den Netzbezug} \\ - PV_{\text{ET}} * PV_{\text{Erz}} * (1 - EVA) & \dots \text{Ertrag für die Netzeinspeisung} \\ + PV_{\text{GK}} * PV_{\text{Erz}} & \dots \text{Jahreskosten der PV-Anlage} \end{array}$$

Der mögliche Gewinn des PV-Systems ergibt sich aus der Differenz der Energiekosten mit und ohne PV-System:

$$PV\text{-Gewinn} = EK_{\text{mit PV}} - EK_{\text{ohne PV}} = \dots = \tag{1}$$

$$[PV_{\text{ET}} - PV_{\text{GK}} + EVA * (BT - PV_{\text{ET}})] * PV_{\text{Erz}}$$

Somit kann ein PV-System auch wirtschaftlich betrieben werden, wenn der PV-Einspeisetarif (PV_{ET}) unter den Gestehungskosten der PV-Anlage (PV_{GK}) liegt, solange der Strom-BezugsTarif (BT) höher als der PV-Einspeisetarif (PV_{ET}) ist und der Eigenverbrauchsanteil (EVA) ein Mindestmass nicht unterschreitet.

⁹ Annahme: Ein Bezugstarif für die Wärmepumpe und den Haushaltsbedarf

In Abbildung 9 wird dieser mögliche Gewinn bzw. Verlust eines PV-Systems in Abhängigkeit des Eigenverbrauchanteiles sowie des Einspeisetarifs dargestellt¹⁰.

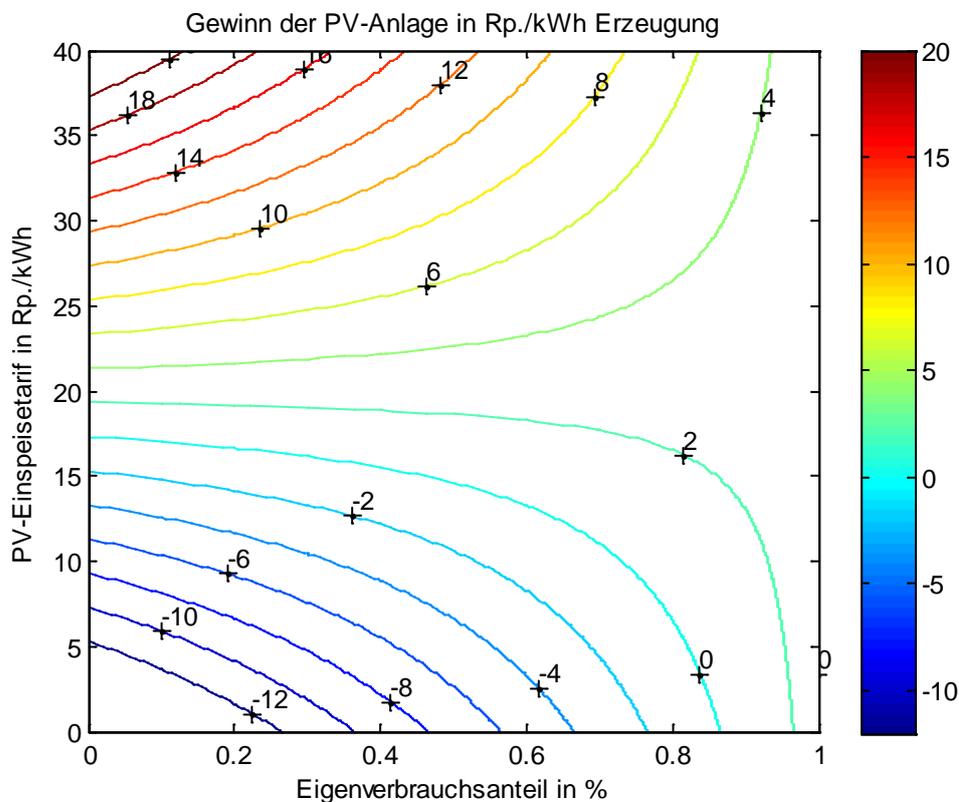


Abbildung 9: Gewinn der PV-Anlage (Rp./kWh) in Abhängigkeit des Einspeisetarifes und des Eigenverbrauchanteiles bei einem Netzbezugstarif von 20 Rp./kWh und PV-Gestehungskosten von 17.3 Rp./kWh

Die Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit des Einspeisetarifes teilt sich im Wesentlichen in drei Bereiche auf:

- a) PV-Einspeisetarif > Netzbezugskosten (20 Rp./kWh):
Solange der PV-Einspeisetarif oberhalb der angenommenen Netzbezugskosten von 20 Rp./kWh liegt, erhöht sich der Gewinn mit der eingespeisten Energie, weshalb möglichst die gesamte Erzeugung eingespeist bzw. entsprechend abgerechnet werden sollte (z.B. wurde bei der KEV bislang die erzeugte PV-Energie vergütet, unabhängig von deren Nutzung).
- b) Netzbezugskosten (20 Rp./kWh) > PV-Einspeisetarif > PV-Gestehungskosten (17.3Rp./kWh)
In diesem Bereich steigt der erwirtschaftete Gewinn der PV-Anlage mit steigendem Eigenverbrauchsanteil.
- c) PV-Einspeisetarif < PV-Gestehungskosten (17.3Rp./kWh)
In diesem Bereich ist ein wirtschaftlicher Betrieb der PV-Anlage erst ab einem bestimmten Eigenverbrauchsanteil möglich. Falls es für die eingespeiste Energie gar keine Vergütung mehr geben würde, rechnet sich eine PV-Anlage hier z.B. ab einem Eigenverbrauchsanteil von 86.5% (= $PV_{GK} / BT = 17.3Rp./kWh / 20 Rp./kWh$).

¹⁰ Annahmen: Strombezugskosten 20 Rp./kWh, PV-Gestehungskosten 17.3Rp./kWh

Ab Erreichen der Netzparität ($PV_Gestehungskosten \leq \text{Netz-Bezugstarif}$) kann somit jede PV-Anlage ab einem gewissen Eigenverbrauchsanteil wirtschaftlich betrieben werden - unabhängig vom gewährten PV-Einspeisetarif.

Geht man von einem ungeförderten PV-Einspeisetarif von 7 Rp./kWh aus, so ist unter den o.g. Annahmen ein wirtschaftlicher Betrieb der PV-Anlage ab einem Eigenverbrauchsanteil von 79% gewährleistet. In weiterer Folge wird mit diesem ungeförderten Einspeisetarif von 7 Rp./kWh gerechnet!

4.1.2 Gestehungskosten des Wärmepumpensystems (ohne Primärenergiekosten)

Die drei wesentlichen Bauteile einer Wärmepumpe sind der Kompressor und die beiden Wärmetauscher, einer auf der kalten und einer auf der warmen Seite. Diese Komponenten werden mit zunehmender Heizleistung grösser, weshalb der Preis einer Wärmepumpenheizung etwa proportional mit der Leistung zunimmt.

Entsprechend der Quelle unterscheidet man zwischen Luft/Wasser-, Sole/Wasser- sowie Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Laut einer 2013 veröffentlichten Studie des BWP (Bundesverband Wärmepumpe) lag die durchschnittliche Jahresarbeitszahl im Neubau bei

- 2.9 für Luft/Wasser-Wärmepumpen,
- 3.7 für Wasser/Wasser-Wärmepumpen, und
- 3.9 für Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Best-Practice-Beispiele erreichten lt. Fraunhofer-Studie im Neubau deutlich höhere Jahresarbeitszahlen [12, S. 30]. Messtechnisch nachgewiesene wurden hier Jahresarbeitszahlen von:

- 3,1 bis 3,4 für Luft/Wasser-Wärmepumpen und
- 4,3 bis 5,1 für Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Die Kosten einer Wärmepumpe liegen im Bereich von 800 bis 1'200 Franken pro kW Heizleistung. Gesamte Wärmepumpenanlagen (Wärmepumpen, Speicher, Wärmetauscher und Installation) kosten etwa 1'500 (Luft/Wasser) bis 6'000 CHF pro kW Heizleistung [13].

Für die Betrachtungen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Wärmepumpensystemkosten (WP_{SK}): 2'500 CHF/ kW Heizleistung
- Jahresarbeitszahl (JAZ) = 3
- Nutzungsdauer: 20 Jahre
- jährliche Wartungskosten: 1.5 % der Investitionssumme
- Wärmepumpennutzungsgrad (WP_{NG}) : 2'000 h/Jahr

Anmerkung: Mithilfe des Wärmepumpennutzungsgrad (WP_{NG}) wird in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs auf die Heizleistung geschlossen ($P_{WP} = E_{Therm} / WP_{NG}$) welche einen wesentlichen

Einfluss auf die Systemkosten hat. In verschiedenen Quellen¹¹ wurde bei Wärmepumpensystemen ein Nutzungsgrade von ca. 2'000 Stunden genannt, weshalb hier dieser Wert gewählt wurde.

Entsprechend den Annahmen ergibt sich die erforderliche Heizleistung ($P_{WP} = E_{Therm} / WP_{NG}$) und somit die Investitionskosten zu

$$\text{Investkosten} = WP_{SK} * E_{Therm} / WP_{NG} = E_{Therm} * 2500 \text{ CHF/kW} / (2000 \text{ h}) = E_{Therm} * 1.25 \text{ CHF /kWh}$$

Die gesamten Systemkosten setzen sich aus den Investitions- und den Betriebskosten zusammen. Bezieht man nun den Jahresanteil der Gesamtkosten auf die jährlich benötigte Heizenergie (E_{Therm}), so erhält man aufgrund linearer Abhängigkeiten die von der benötigten Heizenergie unabhängigen Systemkosten der Wärmepumpe:

$$\begin{aligned} GK_{WP_System} &= \frac{RMZ(\text{Kapitalzins}, \text{Nutzungsdauer}, -\text{Investkosten}) + \text{Investkosten} * BK_{Anteil}}{E_{Therm}} \\ &= \frac{RMZ(\text{Kapitalzins}, \text{Nutzungsdauer}, -WP_{SK}) + WP_{SK} * BK_{Anteil}}{WP_{NG}} = \\ &= RMZ(3\%, 20 \text{ Jahre}, -1.25 \text{ CHF/kWh}) + 1.25 \text{ CHF/kWh} * 1,5\% = \\ &= 8.4 \text{ Rp./kWh} + 1.9 \text{ Rp./kWh} = 10.3 \text{ Rp./kWh} \end{aligned}$$

Der Einfluss der Parameter Kapitalzins, Nutzungsdauer, Investkosten sowie Betriebskostenanteil ist ident mit den PV-Gestehungskosten und in Abbildung 7 ersichtlich.

4.2 Kosten für die benötigte Heizwärme

Die Kosten für die jährliche Heizenergie ergeben sich aus den Gestehungskosten der Wärmepumpe (GK_{WP_System}) und den Kosten für die benötigte Primärenergie. Für vom PV-System zur Verfügung gestellte Primärenergie kommen die Stromgestehungskosten der PV-Anlage (GK_{PV_Anlage}) zum Tragen. Für vom Netz bezogene Energie gilt der Netz-Bezugstarif (BT). Wird von beiden Quellen Energie bezogen, ergibt sich entsprechend den Anteilen ein Mischtarif, welcher hier allgemein mit „Stromtarif“ bezeichnet wird:

Allgemein gilt für die Kosten der Heizenergie:

$$\text{Kosten}_{\text{Heizenergie}} = E_{Therm} * GK_{WP_System} + \frac{E_{Therm}}{JAZ} * \text{Stromtarif}$$

¹¹ Siehe <http://www.erdsondenoptimierung.ch/index.php?id=269463>
https://www.ekz.ch/content/dam/ekz/privatkunden/energieberatung/Fachartikel_Heizungsersatz.PDF.res/Fachartikel_Heizungsersatz.PDF

Daraus ergeben sich die Wärmegestehungskosten:

$$GK_{\text{Heizenergie}} = \frac{\text{Kosten}_{\text{Heizenergie}}}{E_{\text{Therm}}} = GK_{\text{WP}_{\text{System}}} + \frac{\text{Stromtarif}}{\text{JAZ}} =$$

$$= \frac{\text{RMZ}(\text{Kapitalzins}, \text{Nutzungsdauer}, -\text{WP}_{\text{SK}}) + \text{WP}_{\text{SK}} * \text{BK}_{\text{Anteil}}}{\text{WP}_{\text{NG}}} + \frac{\text{Stromtarif}}{\text{JAZ}}$$

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) gibt das Verhältnis der thermisch erhaltenen Energie zur elektrisch aufgewendeten Energie wieder, weshalb Sie den „Stromtarif“ entsprechend gewichtet.

Um den Einfluss der einzelnen Parameter besser abschätzen zu können, wurde auch hier eine Sensitivitätsanalyse mit einer Parametervariation von 50% bis 150% durchgeführt (Wertetabelle ist im Anhang ersichtlich):

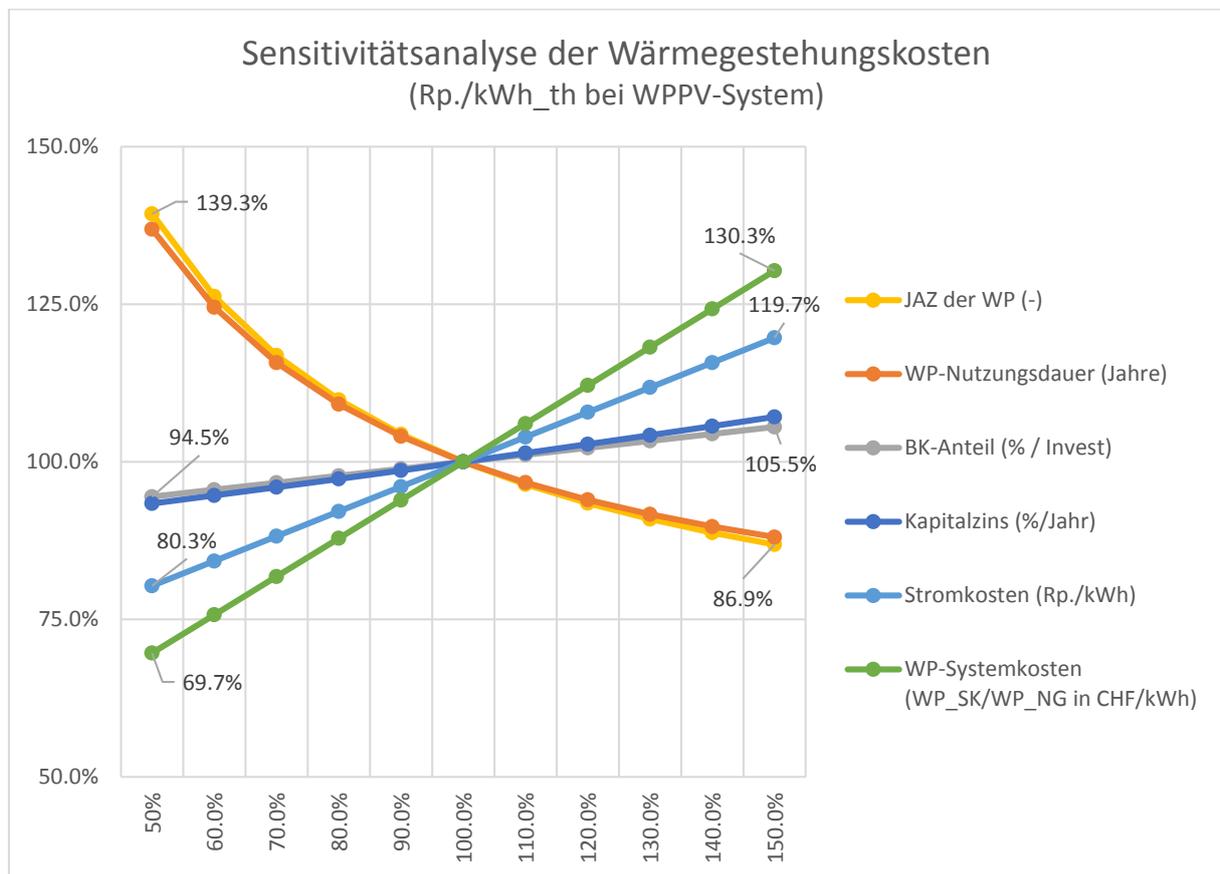


Abbildung 10: Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten bei folgenden 100% Annahmen: JAZ der WP = 3, WP-Nutzungsdauer = 20 Jahre, Betriebskostenanteil = 1.5% / Invest, Kapitalzins = 3%/Jahr, Stromkosten = 20 Rp./kWh, WP-Systemkosten = 2.5 kCHF/kWh

Eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl von 3 auf 4.5 bringt eine Reduktion der Wärmegestehungskosten von mehr als 13%. Hierbei ist zu beachten, dass in Best-Practice-Beispiele bereits im Jahr 2011 Jahresarbeitszahlen grösser 5 messtechnisch nachgewiesen wurden (siehe Kapitel 3.1.2). Erhöht man

die WP-Nutzungsdauer um 50% auf 30 Jahre, so reduzieren sich die Wärmegestehungskosten um ca. 12%.

Die Betriebskostenanteile und der Kapitalzins verändern die Wärmegestehungskosten hier maximal um +/- 5 % bzw. +/- 7 %.

Eine Variation der Stromkosten um +/- 50% verändern die Wärmegestehungskosten um +/- 20% (Anmerkung: Man beachte, dass sich diese Angaben auf die Wärmegestehungskosten beziehen. Die PV-Anlagenparameter wirken hier auf die anzuwendenden „Stromkosten“ und sind explizit in Abbildung 7 dargestellt).

Da das Energiedargebot der PV-Anlage zeitlich nur bis zu einem gewissen Grad mit dem Bedarf der Wärmepumpe korreliert, wird meist auch ein Teil der Energie vom elektrischen Netz bezogen, weshalb hier entsprechend dem Eigenverbrauchsanteil für den Stromtarif ein entsprechender Mischtarif¹² zum Tragen kommt.

Im Kapitel 4.2.1 und 4.2.3 werden die Kosten über den gesamten Bereich von 100% Deckung über das PV-System (Eigenverbrauchsanteil = 100%) bis zu 100% Deckung über das elektrische Netz (Eigenverbrauchsanteil = 0%) abgeschätzt. Die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage wird im Kapitel 4.1.1.1 betrachtet.

Das Gesamtsystem ist energetisch autonom, wenn die von der Wärmepumpe benötigte elektrische Energie über das Jahr gesehen von der PV-Anlage erzeugt wird. Die Differenz zwischen der aktuellen PV-Erzeugung und dem aktuellen Wärmepumpenbedarf wird vom elektrischen Netz ausgeglichen, welches hier als Zwischenspeicher verwendet wird.

4.2.1 Kosten für die Heizwärme bei 100% Deckung durch PV-Anlage

Die Kosten für die jährliche Heizenergie ergeben sich aus den Gestehungskosten der Wärmepumpe (GK_{WP_System}) und den Kosten für die benötigte Primärenergie. Wenn die benötigte elektrische Energie für die Wärmepumpe direkt zu 100% mithilfe des PV-Systems gedeckt wird, entsprechen die Stromkosten den Gestehungskosten des PV-Systems:

$$Kosten_{Heizenergie} = E_{Therm} * GK_{WP_System} + \frac{E_{Therm}}{JAZ} * GK_{PV_Gesamt}$$

¹² Der Mischtarif setzt sich zusammen aus den PV-Gestehungskosten, dem Netzbezugstarif, dem PV-Einspeisetarif sowie dem Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage. Diese Abhängigkeiten werden im Kapitel 4.1.1.1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** genauer erläutert.

Bezieht man die Kosten auf den thermischen Energiebedarf, erhält man die Gestehungskosten für die Heizenergie:

$$GK_{\text{Heizenergie}} = \frac{\text{Kosten}_{\text{Heizenergie}}}{E_{\text{Therm}}} = GK_{\text{WP}_{\text{System}}} + \frac{GK_{\text{PV}_{\text{Gesamt}}}}{\text{JAZ}}$$

Hier ergeben sich bei einer 100% PV-Abdeckung Gestehungskosten für die Heizenergie von:

$$GK_{\text{Heizenergie}} = 10.3 \text{ Rp./kWh}_{\text{th}} + \frac{17.3 \text{ Rp./kWh}_{\text{El}}}{3} = 16.0 \text{ Rp./kWh}_{\text{th}}.$$

4.2.2 Kosten für die Heizwärme in Abhängigkeit des Eigenverbrauchanteiles

Legt man die PV-Anlage so aus, dass die für die Wärmepumpe benötigte Energie über das Jahr gesehen zu 100% von der PV-Anlage gedeckt wird (Autonomie von 100%), so hängen die Stromkosten vom Eigenverbrauchsanteil EVA, dem Netzbezugstarif und dem PV-Einspeisetarif ab. Unter der Annahme eines Netzbezugstarifes von 20 Rp./kWh und einem PV-Einspeisetarif von 7 Rp./kWh, können die Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit des Eigenverbrauchsanteils dargestellt werden.

Eigenverbrauchsanteil	PV-Anlagekosten	PV-Wartungskosten	WP-Anlagekosten	WP-Wartungskosten	Primärenergiekosten für WP ¹³	Wärmegestehungskosten
%	Rp./kWh _{th}	Rp./kWh _{th}				
0%	4.71	1.05	8.40	1.88	4.33	20.37
10%	4.71	1.05	8.40	1.88	3.90	19.93
20%	4.71	1.05	8.40	1.88	3.47	19.50
30%	4.71	1.05	8.40	1.88	3.03	19.07
40%	4.71	1.05	8.40	1.88	2.60	18.63
50%	4.71	1.05	8.40	1.88	2.17	18.20
60%	4.71	1.05	8.40	1.88	1.73	17.77
70%	4.71	1.05	8.40	1.88	1.30	17.33
80%	4.71	1.05	8.40	1.88	0.87	16.90
90%	4.71	1.05	8.40	1.88	0.43	16.47
100%	4.71	1.05	8.40	1.88	0.00	16.03

Tabella 3: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit des Eigenverbrauchsanteiles bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren

Geht man von einem typischen Eigenverbrauchsanteil von 30% und einer Nutzungsdauer des WP-PV-System von 20 Jahren aus, so erhält man Wärmegestehungskosten von 19.07 Rappen pro kWh thermischer Energie (kWh_{th}).

Zu beachten ist, dass die Anlagenkosten der PV- und WP-Anlage dabei wesentlich für die Wärmegestehungskosten verantwortlich sind (Kostenanteil von 64% bis 82%!).

¹³ „Primärenergiekosten für WP“ = „Speicherkosten für elektr. Energie / JAZ“, da diese Größe hier auf die thermische Energie bezogen wird

Erhöht sich die Nutzungsdauer des WP-PV-System von 20 auf 30 Jahre, so reduzieren sich die Wärmegestehungskosten von 19.07 auf 15.91 Rp. pro kWh thermischer Energie (kWh_{th}):

Eigenverbrauchs- anteil	PV-Anlage- kosten	PV-Wartungs- kosten	WP-Anlage- kosten	WP- Wartungs- kosten	Primärenergie- kosten für WP ¹³	Wärme- Gestehungskosten
%	Rp./kWh _{th}	Rp./kWh _{th}	Rp./kWh _{th}	Rp./kWh _{th}	Rp./kWh _{th}	Rp./kWh _{th}
0%	3.57	1.05	6.38	1.88	4.33	17.21
10%	3.57	1.05	6.38	1.88	3.90	16.77
20%	3.57	1.05	6.38	1.88	3.47	16.34
30%	3.57	1.05	6.38	1.88	3.03	15.91
40%	3.57	1.05	6.38	1.88	2.60	15.47
50%	3.57	1.05	6.38	1.88	2.17	15.04
60%	3.57	1.05	6.38	1.88	1.73	14.61
70%	3.57	1.05	6.38	1.88	1.30	14.17
80%	3.57	1.05	6.38	1.88	0.87	13.74
90%	3.57	1.05	6.38	1.88	0.43	13.31
100%	3.57	1.05	6.38	1.88	0.00	12.87

Tabelle 4: Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit des Eigenverbrauchsanteiles bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren

Wie zu erwarten haben auch hier die Anlagenkosten der PV- und WP-Anlage dabei den grössten Einfluss auf die Wärmegestehungskosten (Kostenanteil zwischen 58% und 77%!).

Die Wärmegestehungskosten bei einem Eigenverbrauchsanteil von 30% und einer Nutzungsdauer von 20 bzw. 30 Jahren werden zukünftig für den Vergleich mit den Dämmkosten herangezogen werden.

Hinweis: Die dargestellten Strom-Kosten wurden hier mithilfe der Jahresarbeitszahl (JAZ) auf die thermische Energie bezogen (kWh_{th}).

4.2.3 Kosten für die Heizwärme ohne PV-System

Falls die benötigte elektrische Energie zu 100% über das Netz gedeckt wird, kommt der Netz-BezugsTarif (BT) anstatt der PV-Gestehungskosten (GK_{PV_Gesamt}) zum Tragen. Zwischenzeitlich bieten viele EVU's keine speziellen Wärmepumpentarife mehr an, weshalb hier mit einem aktuell typischen Haushalts-Bezugstarif (BT) von 20 Rp./kWh gerechnet wird.

Bei einer Wärmepumpen-Nutzungsdauer von 20 Jahren ergeben sich die Wärmegestehungskosten zu:

$$GK_{\text{Heizenergie}} = GK_{\text{WP}_{\text{System}}} + \frac{BT}{JAZ} = 10.3 \text{ Rp./kWh}_{\text{th}} + \frac{20 \text{ Rp./kWh}_{\text{El}}}{3} = 16.9 \text{ Rp./kWh}_{\text{th}}$$

Bei einer WP-Nutzungsdauer von 30 Jahren:

$$GK_{\text{Heizenergie}} = GK_{\text{WP}_{\text{System}}} + \frac{BT}{JAZ} = 8.3 \text{ Rp./kWh}_{\text{th}} + \frac{20 \text{ Rp./kWh}_{\text{El}}}{3} = 14.9 \text{ Rp./kWh}_{\text{th}}.$$

Man erkennt, dass bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 30 Jahren sich die PV-Anlage bei einem WP-PV-System ab einem Eigenverbrauchsanteil von ca. 55% ökonomisch rechnet.

Bei einer geringeren Nutzungsdauer von 20 Jahren ist ein wirtschaftlicher Betrieb der PV-Anlage ab einem Eigenverbrauchsanteil von 80% möglich.

5 Dämmkosten im Vergleich zu den WP-PV-Kosten

Die Gestehungskosten für thermische Energie mithilfe eines WP-PV-System liegen entsprechend dem Kapitel 4.2.2 aktuell im Bereich von 13...21 Rp./kWh_{th}. Für eine Visualisierung sollen im Folgenden die typischen Werte bei 30% Eigenverbrauchsanteil und 20 bzw. 30 Jahren Nutzungsdauer mit 19.1 Rp./kWh_{th} bzw. 15.9 Rp./kWh_{th} verwendet werden.

Die in Kapitel 3 beschriebenen Dämmkosten lagen im Bereich von 8...28 Rp./kWh_{th}.

In Abbildung 11 werden die relativen Dämmkosten der Sanierungsmassnahmen gemeinsam mit den WP-PV-Gestehungskosten dargestellt. Man erkennt, dass bereits unter diesen Annahmen die Kosten für eine WP-PV-Anlage teilweise unter den Dämmkosten von Sanierungsmassnahmen liegen:

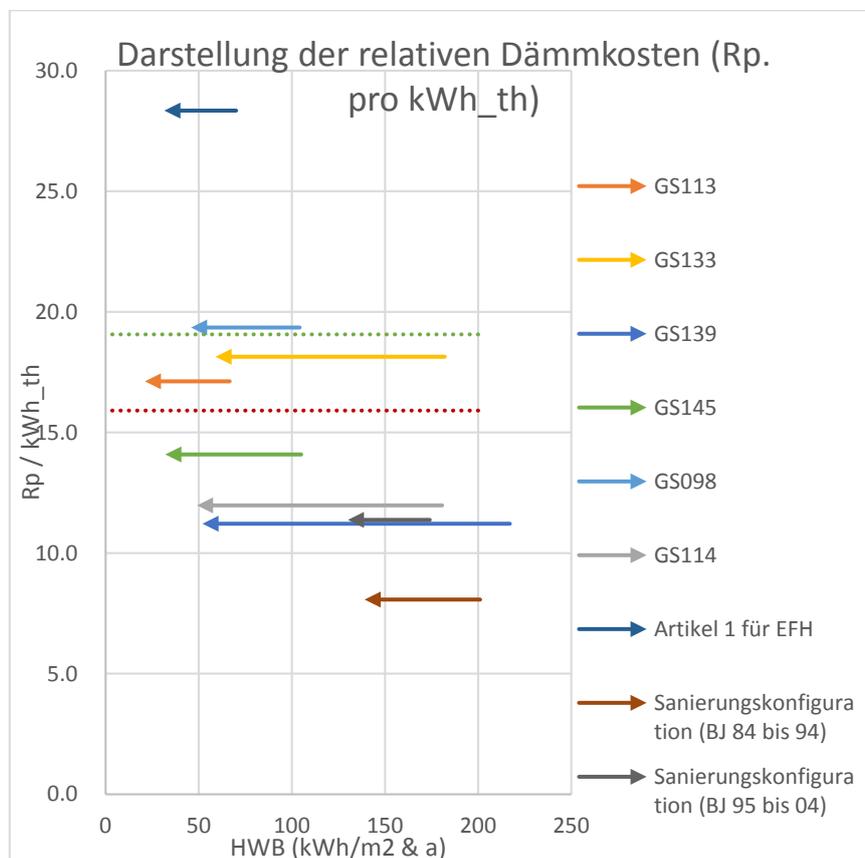


Abbildung 11: Wärme-Gestehungskosten eines WP-PV-Systems im Vergleich zu den rel. Dämmkosten (Rp. / kWh_{th})

Wie bereits erwähnt, steigen die Kosten für eine zusätzliche Wärmedämmung tendenziell an,

- je besser die thermische Situation vor der Sanierungsmaßnahme war (Startpunkt) und
- je besser der gewünschte Endpunkt ist.

Diese Tendenz ist gut zu erkennen, wenn man die relativen Dämmkostenanteile am harmonischen Mittelwert des Heizwärmebedarfs ($= 2 / (1/ HWB_{\text{vor der Sanierung}} + 1/ HWB_{\text{nach der Sanierung}})$) darstellt.

Diese Abhängigkeit besteht bei den WP-PV-Systemen nicht, weshalb Sie in Abbildung 12 als durchgezogene Linie dargestellt sind.

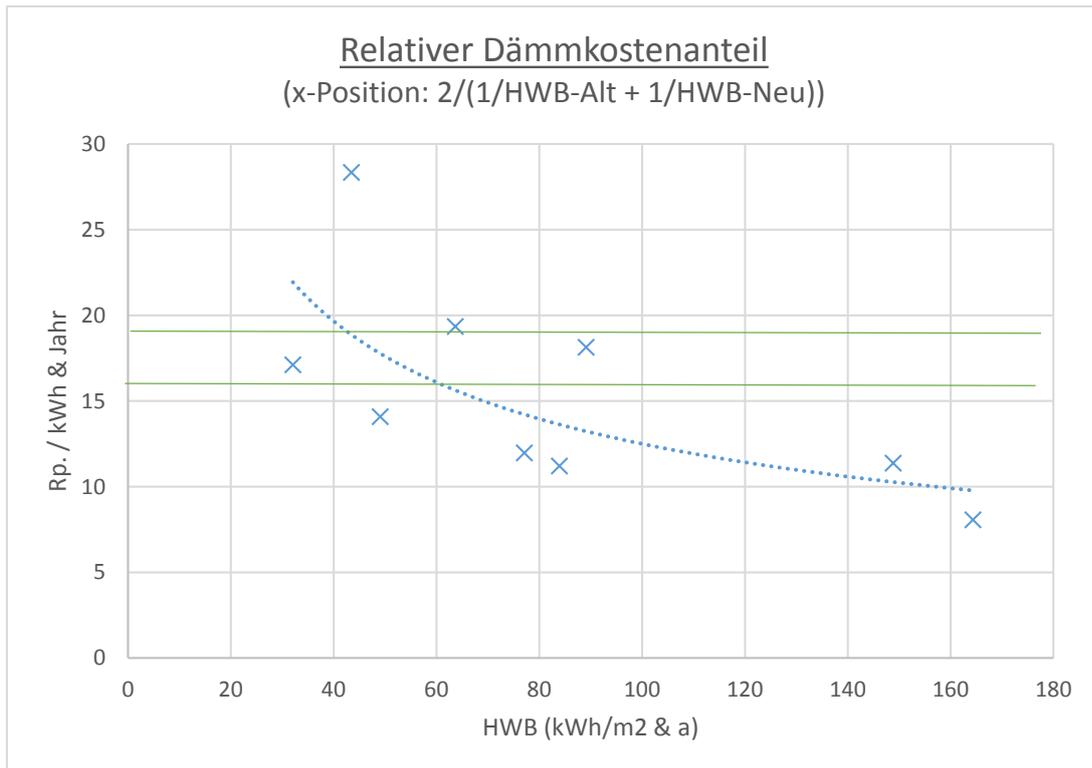


Abbildung 12: Dämmkosten der ausgewählten Objekte (x) im Vergleich zu den WP-PV-Wärmegestehungskosten (--)

Bei der Dämmung kann allgemein nur schwer abgeschätzt werden, welche Massnahme welche Kosten bzw. Nutzen generiert. Dementsprechend muss jedes Gebäude individuell betrachtet und analysiert werden.

Hierbei sollte auch eine Kombination Dämmung und WP-PV System betrachtet werden:

- Dämmung, wo es besonders effizient ist
- WP-PV-System für den Restwärmebedarf und Brauchwarmwassererzeugung

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass WP-PV-Anlagen bereits aktuell ökonomisch sowie ökologisch sinnvoll betrieben werden können. Berücksichtigt man, dass für die Deckung des Restwärmebedarfs ebenfalls ein Heizsystem nötig ist bzw. auch das Warmwasser mit einem System zur Verfügung gestellt werden muss, so verbessert sich die Bilanz für die WP-PV-Anlage noch einmal deutlich. Weiters werden grössere WP-PV-Anlagen tendenziell günstiger, was sich noch einmal positiv auf die WP-PV-Bilanz auswirkt.

Den elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe kann über das Jahr gesehen in den meisten Fällen leicht von einer PV-Anlage zur Verfügung gestellt werden. Da PV-Erzeugung und WP-Bedarf zeitlich allerdings nicht immer übereinstimmen (Autarkiegrad < 1), wird das elektrische Netz als Pufferspeicher verwendet. Die angeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde mit einem förderfreien PV-Einspeisetarif von 7 Rp./kWh durchgeführt, woraus sich eine „Speichergebühr“ von 13 Rp./kWh¹⁴ für die Zwischenspeicherung der Energie ergibt. Trotz dieser für das WP-PV System ungünstigen Annahmen liegen die Wärmegestehungskosten aktuell bereits teilweise unter den thermischen Sanierungskosten!

Eine Anhebung des PV-Einspeisetarifes bzw. Förderung der PV-Anlage würde hier noch zu einer deutlichen Wirtschaftlichkeitssteigerung beitragen. In Abbildung 9 ist der Einfluss des PV-Einspeisetarifs und des Eigenverbrauchsanteils auf die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage ersichtlich.

Mit einer Erhöhung der PV-Anlagenleistung sowie einer speziellen „Winterausrichtung“ kann der Zwischen-Speicherbedarf reduziert und der Autarkiegrad erhöht werden. In diesem Zusammenhang kann auch der Einsatz von Batteriespeichern in Betracht gezogen werden, allerdings können diese aktuell noch nicht wirtschaftlich betrieben werden.

Bei Wärmepumpensystemen wird die Effizienz und somit die Jahresarbeitszahl (JAZ) weiter zunehmen, was den elektrischen Bedarf noch weiter reduzieren wird. Dementsprechend wird der Einfluss von Strompreissteigerungen gedämpft (Faktor $1/JAZ$), bzw. kann dieser mithilfe der PV-Anlage noch weiter reduziert werden. Darüber hinaus werden die PV-Anlagekosten noch weiter sinken, was sich direkt auf die Stromgestehungskosten auswirkt.

Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass die Wärmegestehungskosten für WP-PV Systeme zukünftig noch weiter fallen werden, wohingegen bei den Dämm- und Sanierungsmassnahmen mit weiter steigende Preisen zu rechnen ist.

Dies wird zu einer weiteren Verbreitung von WP-PV Systemen führen, da diese eine echte Alternative zu konventionellen Dämmmassnahmen darstellen, bzw. diese auch sehr gut ergänzen können.

¹⁴ Die Speichergebühr ergibt sich aus der Differenz des Netz-Bezugstarifes (BT) und PV-Einspeisetarifes (PV_{BT}): 20 Rp./kWh – 7 Rp./kWh = 13 Rp./kWh)

7 Literaturverzeichnis

- [1] U. Bigalke, H. Discher, und H. Lukas, „Der dena Gebäudereport 2012“, dena, Berlin, 2225, Sep. 2012.
- [2] Hochbauamt der Stadt Zürich, „Neue Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE)“. 2009.
- [3] EnDK, BFE, und BAFU, „Das Gebäudeprogramm“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.dasgebaeudeprogramm.ch/index.php/de/>. [Zugegriffen: 07-Aug-2014].
- [4] P. Biermayr, Kristöfel, Enigl, und Strasser, „Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2013“, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Juni 2014.
- [5] „Konkurrenz auf dem Dach | Technology Review“, 21-Mai-2012. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.heise.de/tr/artikel/Konkurrenz-auf-dem-Dach-1577823.html>. [Zugegriffen: 13-Aug-2014].
- [6] Lenum AG - Brey, „Vergleich Heizwärmebedarf_140425“, 25-Apr-2014.
- [7] „BMW - Sanierungskonfigurator“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.sanierungskonfigurator.de/start.php>. [Zugegriffen: 29-Juli-2014].
- [8] R. Haimann, „Haussanierung: Die große Lüge von der Wärmedämmung -“, 29-März-2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.welt.de/finanzen/immobilien/article114866146/Die-grosse-Luege-von-der-Waermedaemmung.html>. [Zugegriffen: 29-Juli-2014].
- [9] A. Toller, „Umstrittene Ersparnis: Kostenfalle Wärmedämmung“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.wiwo.de/finanzen/immobilien/umstrittene-ersparnis-kostenfalle-waermedaemmung/7243848.html>. [Zugegriffen: 29-Juli-2014].
- [10] „Aktuelle Photovoltaikpreise“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.photovoltaik.org/wirtschaftlichkeit/photovoltaik-preise>. [Zugegriffen: 29-Juli-2014].
- [11] C. Kost, J. Mayer, und J. Thomsen, „Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energieträger (Fraunhofer ISE)“, Fraunhofer ISE, Nov. 2013.
- [12] „BWP-Branchenstudie 2013“, Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., Berlin, Aug. 2012.
- [13] „Wärmepumpe - energie.ch“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.energie.ch/waermepumpe>. [Zugegriffen: 30-Juli-2014].
- [14] „Fraunhofer ISE 2013 Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energieträger“ . .

8 Anhang - Verwendete Kurzzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Beschreibung
BT	Rp. / kWh	BezugsTarif für die elektrische Energie (inkl. der Steuern und Abgaben)
EK	CHF	EnergieKosten für die elektrische Energie
E_{Therm}	kWh / Jahr	Thermische Energiebedarf pro Jahr
EVA	%	Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage (direkt verwendete Energie / Jahreserzeugen der PV-Anlage)
GK_{PV_Gesamt}	Rp./kWh_El	Gestehungskosten für das gesamte PV-System pro erzeugter kWh
GK_{WP_System}	Rp./kWh	Gestehungskosten für das gesamte WP-System (elektr. Energiekosten sind hier nicht enthalte)
GK_{xxx}	Rp./kWh Rp./kWh_El	Gestehungskosten für thermische bzw. elektrische Energie.
$HB_{Energie}$	kWh	elektrische Energiebedarf für des Haushaltes
JAZ	-	JahresArbeitsZahl: Verhältnis der über das Jahr abgegebenen Wärme zur aufgenommenen elektrischen Energie
JKA_{xxx}	CHF/Jahr	Jahres-Kosten-Anteil
PV_{Erz}	kWh	Jahreserzeugung der PV-Anlage
PV_{ET}	Rp. / kWh	PV-Einspeisetarif
PV_{GK}	Rp. / kWh	PV Gestehungskosten (Jahreskosten / Jahreserzeugung)
RMZ	CHF/ Jahr	RegelmässigeZahlung: Ermittelt die konstante Zahlung einer Annuität (Excel-Funktion)
$WP_{Energie}$	kWh	elektrische Energiebedarf für die Wärmepumpe
WP_{NG}	h/Jahr	Wärmepumpen-NutzungsGrad: Jährliche Betriebsstunden der Wärmepumpe
WP_{SK}	CHF / kW	Wärmepumpensystemkosten (CHF / kW Heizleistung)
Yield	kWh_El	Jahres-Energie-Ertrag der PV-Anlage

Typische Stromgestehungskosten von PV-Anlagen (Quelle: Fraunhofer ISE [14, S. 21])



Abbildung 8: Stromgestehungskosten für PV-Anlagen in Deutschland je Anlagentyp und Einstrahlung (GHI in kWh/(m²a)) im Jahr 2013.

8.1 Tabelle - Sensitivitätsanalyse der PV-Gestehungskosten (Rp./kWh_el)

						Sensitivität der PV-Gestehungskosten auf die				
Parameter-Variation	Nutzungsdauer (Jahre)	PV-Systemkosten (CHF/kWp)	PV_Ertrag (kWh/kWp)	Kapitalzins (%/Jahr)	BK-Anteil (% / Invest)	Nutzungsdauer (Jahre)	PV-Systemkosten (CHF/kWp)	PV_Ertrag (kWh/kWp)	Kapitalzins (%/Jahr)	BK-Anteil (% / Invest)
50%	10	1'050	500	1.5%	0.75%	160.8%	50.0%	200.0%	89.1%	90.9%
60.0%	12	1'260	600	1.8%	0.90%	140.4%	60.0%	166.7%	91.2%	92.7%
70.0%	14	1'470	700	2.1%	1.05%	125.9%	70.0%	142.9%	93.4%	94.5%
80.0%	16	1'680	800	2.4%	1.20%	115.1%	80.0%	125.0%	95.5%	96.4%
90.0%	18	1'890	900	2.7%	1.35%	106.7%	90.0%	111.1%	97.7%	98.2%
100.0%	20	2'100	1'000	3.0%	1.50%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
110.0%	22	2'310	1'100	3.3%	1.65%	94.6%	110.0%	90.9%	102.3%	101.8%
120.0%	24	2'520	1'200	3.6%	1.80%	90.1%	120.0%	83.3%	104.6%	103.6%
130.0%	26	2'730	1'300	3.9%	1.95%	86.3%	130.0%	76.9%	107.0%	105.5%
140.0%	28	2'940	1'400	4.2%	2.10%	83.1%	140.0%	71.4%	109.3%	107.3%
150.0%	30	3'150	1'500	4.5%	2.25%	80.3%	150.0%	66.7%	111.8%	109.1%

8.2 Tabelle - Sensitivitätsanalyse der Wärme-Gestehungskosten (Rp./kWh_th bei WP-PV-System)

							Sensitivität der Heizenergiekosten (Rp./kWh_th) auf die					
Parameter-Variation	Nutzungsdauer (Jahre)	WP-Systemkosten (CHF/kWh)	Kapitalzins (%/Jahr)	BK-Anteil (% / Invest)	Stromkosten (Rp./kWh)	JAZ der WP (-)	Nutzungsdauer (Jahre)	WP-Systemkosten (CHF/kWh)	Kapitalzins (%/Jahr)	BK-Anteil (% / Invest)	Stromkosten (Rp./kWh)	JAZ der WP (-)
50%	10	1'250	1.5%	0.75%	10.0	1.5	136.9%	69.7%	93.4%	94.5%	80.3%	139.3%
60.0%	12	1'500	1.8%	0.90%	12.0	1.8	124.5%	75.7%	94.7%	95.6%	84.3%	126.2%
70.0%	14	1'750	2.1%	1.05%	14.0	2.1	115.7%	81.8%	96.0%	96.7%	88.2%	116.9%
80.0%	16	2'000	2.4%	1.20%	16.0	2.4	109.1%	87.9%	97.3%	97.8%	92.1%	109.8%
90.0%	18	2'250	2.7%	1.35%	18.0	2.7	104.1%	93.9%	98.6%	98.9%	96.1%	104.4%
100.0%	20	2'500	3.0%	1.50%	20.0	3.0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
110.0%	22	2'750	3.3%	1.65%	22.0	3.3	96.7%	106.1%	101.4%	101.1%	103.9%	96.4%
120.0%	24	3'000	3.6%	1.80%	24.0	3.6	94.0%	112.1%	102.8%	102.2%	107.9%	93.4%
130.0%	26	3'250	3.9%	1.95%	26.0	3.9	91.7%	118.2%	104.2%	103.3%	111.8%	90.9%
140.0%	28	3'500	4.2%	2.10%	28.0	4.2	89.7%	124.3%	105.7%	104.4%	115.7%	88.8%
150.0%	30	3'750	4.5%	2.25%	30.0	4.5	88.1%	130.3%	107.1%	105.5%	119.7%	86.9%